

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Федеральное государственное автономное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт природных ресурсов

Направление подготовки (специальность): «Нефтегазовое дело» («Строительство глубоких нефтяных и газовых скважин в сложных горно-геологических условиях»)

Кафедра бурения скважин

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

<b>Тема работы</b>
«Разработка улавливающе-подпитывающего устройства для замены изношенных шаров новыми в процессе рейса при шароструйном бурении скважины»

УДК 622.243.43.05.

Студент

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2БМ5Д	Рыбалко Павел Николаевич		

Руководитель

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Ковалев Артем Владимирович	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
доцент	Романюк Вера Борисовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ассистент	Немцова Ольга Александровна	—		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

<b>Зав. кафедрой</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
бурения скважин	Ковалев Артем Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

## АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа содержит 110 с., 15 рис., 11 табл., 36 литературных источников, 1 прил.

Ключевые слова: шароструйное бурение, модернизация шароструйно-эжекторного бурового снаряда, разработка конструкции ШУ, пути модернизации, анализ, эффективность метода, экономическая целесообразность, охрана труда, модель, исследование, поиск решения проблемы.

Объектом исследования является шароструйный методом бурения.

Цель работы – повышение эффективности шароструйного бурения в твердых и крепких горных породах за счет модернизация разработанного на кафедре бурения шароструйного снаряда, конструкция которого позволит осуществлять улавливание изношенных шаров без подъема инструмента.

В процессе исследования проводился анализ способов управления элементами забойного оборудования. Разработка схем забойных шароуловителей. Приведены мероприятия по охране труда, охране окружающей среды, приведен технико-экономический расчет.

В результате исследования был выбран наиболее оптимальный способ воздействия на шароструйно-эжекторно буровой снаряд. В ходе разработки схем забойных шароуловителей, была выявлена более эффективная модель позволяющая решить проблему затрат времени на операции по замене изношенных шаров новыми.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: расчет геометрических параметров шароструйного снаряда, разработка конструкции ЗУ, расчет технологических параметров пружины толкателя, профилирование кулачка, профилирование внутренней части кулачка.

Степень внедрения: неоднократно проводились разработки в конце девяностых годов, которые так и не позволили решить проблему

экономической целесообразности. Широкое применение в бурении не получил.

Область применения: шароструйное бурение скважин применимо, как в нефтяной промышленности, так и в гражданской.

Экономическая эффективность/значимость работы: модернизация шароструйно-эжекторного бурового снаряда позволила сократить общее время бурения. Как следствие сократились: фонд оплаты труда, расходы материалов, амортизационные отчисления.

В будущем планируется реализация концепта и повсеместное применение шароструйного бурения скважин.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 Литературный обзор .....	13
1.3 Тенденции развития шароструйного бурения скважин.....	13
1.2 Имеющийся задел по разработке улавливающе-подпитывающего устройства .....	23
1.2.2. Разработка забойного шаропитателя .....	27
1.3 Анализ способов управления элементами забойного оборудования.....	29
1.3.1 Скважинные расширители .....	29
1.3.2 Пакеры и якоря.....	31
1.3.3. Подвески хвостовик.....	32
2 Разработка схем забойных шароуловителей.....	34
2.1 Исследование процесса улавливания шаров.....	34
2.2 Стадии движения шаров в процессе шароструйного бурения .....	39
2.3 Выявление путей модернизации ШУ.....	41
Поиск решения проблемы направления движения шаров.....	45
2.4 Описание цикла работы модернизированного ШУ.....	47
3 Разработка схем забойных шаропитателей.....	48
3.1 Исследование процесса подпитки шарами.....	48
3.2 Выявление причин заклинивания шаров.....	50
3.3 Выявление путей модернизации ШП.....	53
3.4 Поиск решения проблемы подпитки изношенных шаров новыми ...	56
3.5 Описание цикла работы модернизированного ШУ.....	59
4 Синхронизация работы забойных шаропитателей и шароуловителей.....	62
4.1 Сборка блоков ШП и ШУ .....	62
4.2 Описание цикла работы модернизированного шароструйного снаряда .....	65
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	66
5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	67
5.2 Проведение анализа безубыточности инженерного проекта .....	68
5.3 Составление бюджета разработки и внедрения инженерных решений .....	71
5.3.1 Снижение фонда оплаты труда.....	71
5.3.2 Снижение амортизационных отчислений.....	71

5.3.3 Снижение затрат на спецодежду и спецтранспорт.....	72
6 социальная ответственность .....	76
6.1 Производственная безопасность .....	76
6.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению.....	81
6.3 Экологическая безопасность.....	83
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	85
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	92
Список использованных источников .....	93
Приложение (А) .....	97

## ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике бурения скважин наблюдается тенденция к увеличению объема буровых скважин различного назначения в твердых и крепких породах.

Применение механического способа бурения в крепких и твердых горных породах оказалось недостаточно эффективным, несмотря на то, что постоянно совершенствуются долота.

В данный момент известно множество других способов разрушения горных пород помимо классического механического: гидравлические, термические, взрывоударные, электрические и комбинированные способы разрушения. На данном этапе развития техники не представляется возможным увеличение эффективности разрушения горных пород на забое при механическом способе бурения ввиду достаточно низкой изнosoустойчивости породоразрушающего инструмента и относительно малой мощности, подводимой к забою.

По результатам исследования профессора Спивака А.И. коэффициент передачи мощности на забой при механическом бурении составляет от 0,03 до 0,2. Анализ альтернативных способов бурения горных пород показал, что в ближайшие годы вряд ли осуществимо широкое применение лазера, плазмы, электронного луча, термоструй и взрыва. Тем не менее, многие исследователи считают, что возможно применение гидравлических и гидромеханических способов разрушения горных пород.

В настоящий момент гидравлический способ применяется в мягких и рыхлых породах. Использование этого способа для разрушения твердых и средней крепости горных пород потребует значительного увеличения гидравлической мощности на забое. Бурение твердых и прочных пород осуществляется гидромеханическим способом, при котором разрушение пород на забое происходит за счет энергии потока промывочной жидкости с содержанием абразивных частиц либо шаров с высокой кинетической энергией. В первые предложили способ шароструйного бурения американцы

Ф.Г. Дэйли и Эскел И.Э., который оказался наиболее перспективным с практической точки значимости.

Ряд некоторых технологических и технических проблем, возникающих при реализации гидродинамического способа разрушения горных пород, может быть решен за счёт шароструйного способа бурения скважин, который заключается в разрушении горных пород ударами высокоскоростных шаров, непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины.

Шароструйный способ бурения исследовали А.Н. Давиденко, О.Л. Дербенева, А.В. Дугарцыренов, Т.Н. Зубкова, А.А. Игнатов, В.П. Коротков, М.Н. Нурлыбаев, М.М. Майлибаев, А.Б. Уваков, Н.Т. Туякбаев, А.В. Штрассер, F.H. Deily, I.E. Eckel, A.B. Hildebrandt, L.W. Ledgerwood, A.W. McCray, E.M. McNatt, J.E. Ortloff, G.H. Ramsey, M. Roth, P.S. Williams, У.Леджервуд и др. В ходе исследований Уваков А. Б. обнаружил возможность достижения высокой механической скорости бурения (до 20 м/час в крепких горных породах), а работа казахского ученого С.А. Заурбекова показала превышение механической скорости на 20% и проходки на долото на 43% относительно серийных долот при бурении пород средней твердости.

В Национальном исследовательском Томском политехническом университете на кафедре бурения разработали установку для абразивного бурения с применением долота гидромониторно-эжекционного типа, которую в дальнейшем преобразовали в установку для шароструйного бурения. В ее основу лег принцип разрушения горной породы посредством непрерывной циркуляции породоразрушающих частиц на забое, который осуществляется за счет струйного аппарата, приводимого в действие потоком промывочной жидкости.

В ходе лабораторных исследований были выявлены существующие проблемы шароструйного бурения и определены основные направления их решения. В частности, была поставлена задача по значительному сокращению времени на спускоподъемные операции при проведении полевых работ.

Резюмируя, в данный момент наиболее актуальна разработка новых технических средств и оптимальных геометрических параметров буровых снарядов.

### **Цель работы.**

Основной целью работы является повышение эффективности шароструйного бурения в твердых и крепких горных породах за счет модернизации разработанного на кафедре бурения шароструйного снаряда, конструкция которого позволит осуществлять подпитку и замену изношенных шаров без подъема инструмента или разработку нового улавливающе-подпитывающего устройства.

**Предметом данного исследования** является эффективное улавливающе-подпитывающее устройство, способное снизить затраты времени на операции по замене изношенных шаров новыми в процессе шароструйного бурения скважин.

### **Задачи исследования.**

Необходимые задачи для достижения цели:

- анализ тенденции развития шароструйного бурения скважин с целью выявления перспективности данного способа бурения;
- обзор и анализ имеющегося задела по разработке улавливающе-подпитывающего устройства;
- Анализ способов управления элементами забойного оборудования и последующей классификации данных способов;
- Разработка схем забойных шаропитателей и шароуловителей с дальнейшей их синхронизацией;

**Методика исследований.** Методы исследования, которые позволят решить поставленные задачи:

- Анализ существующих исследований с последующей систематизацией;
- творческое осмысление существующих схем улавливающе-подпитывающего устройства;

Основное содержание работы изложено в MS Word.



**В данной работе произведен сбор и анализ** литературных источников по тематике шароструйного бурения, а также разработана классификация способов воздействия на элементы забойного оборудования и конструкций забойных шароуловителей.

# **1 Литературный обзор**

## **1.1 Тенденции развития шароструйного бурения скважин**

В настоящее время в мировой практике бурения скважин наблюдается тенденция к повышению объема бурения в твердых горных породах, характеризующегося низкими значениями механической скоростью бурения и проходки на долото. В связи с этим, актуальность приобретают разработки альтернативных способов разрушения твердых горных пород. Одним из перспективных является шароструйное бурение, суть которого заключается в разрушении пород ударами непрерывно циркулирующих в призабойной зоне скважины металлических шаров. Циркуляция осуществляется при помощи шароструйно-эжекторного бурового снаряда (ШЭБС). Потенциально, данный способ может дать значительный прирост скорости бурения в интервалах твердых горных пород, снизить денежные затраты за счет сокращения времени проведения спуско-подъемных операций. Кроме того, шароструйный способ, легко вписываясь в существующую технологию бурения с выносом шлама промывочной жидкостью, не потребует значительного переоборудования буровой установки.

Способ разрушения горных пород ударами шаров был предложен в 1955 г. группой ученых американской нефтяной компании «Картер Ойл К°». Результаты этих исследований освещены в работах И.Э. Эскеля, Ф.Г. Дэйли, Л.У. Леджервурда [1, 2]. Некоторые данные приводятся в работах А.У. Маккрея и Ф.У. Коле [3]. Целью исследований была разработка более эффективного способа бурения нефтяных скважин. Убедившись в возможности разрушения горных пород ударами быстродвижущихся шаров, исследователи решили проблему создания устройства, позволяющего осуществлять разгон шаров и их рециркуляцию. Устройством, наиболее полно отвечающим этим требованиям, оказался струйный насос.

В результате проведенных лабораторных исследований было установлено, что наибольшая механическая скорость проходки наблюдается в случае использования шаров максимально возможного диаметра, не

заклинивающихся в камере смешения струйного насоса. Также установлено увеличение механической скорости бурения при максимально возможном расходе, при котором не происходит вынос шаров из скважины. При бурении известняка была достигнута скорость проходки 6,8 м/ч (при расходе 254 л/мин, перепаде давления в сопле струйного насоса 4,4 МПа). Использование глинистого раствора обусловило падение скорости бурения на 25%, а воздуха - на 75 % по сравнению с использованием воды. Необходимо отметить, что для определения расхода шаров и скорости их движения в камере смешения струйного насоса использовался специальный шариковый электромагнитный детектор, а процесс заклинивания шаров в камере смешения исследовался с помощью высокоскоростной видеосъемки.

На основе результатов лабораторных исследований были сконструированы два шариковых бура диаметром 228,7 мм для бурения скважин [1]. Буры имели сменные камеры смешения диаметром 89 и 102 мм и набор сопел диаметром от 15,9 до 23,8 мм. Следует отметить, что аппараты были изготовлены из стали SAE4340 и закалены до твердости 36-40 С по Роквеллу. Сопла изготавливали из вольфрамо-кобальтового твердого сплава. Шары производились на специальном прессе из стали SAE52100 и закалялись до твердости 50-53 С по Роквеллу. Испытания калибровочных лап при воздействии на бур осевой нагрузки 12,2 тс и крутящего момента, равного 693 кгсм, показали их удовлетворительную прочность.

В ходе промышленных испытаний было пробурено 16,2 м в мраморе, известняке и розовом кварците с применением в качестве промывочной жидкости воды. В табл. 1 представлены условия проведения испытаний.

При бурении оклахомского мрамора (мягкая порода) средний диаметр скважины равнялся 270 мм, а средняя скорость проходки составила 2,29 м/ч. По вирджинскому известняку (порода средней крепости) была получена средняя механическая скорость 1,22 м/ч при диаметре скважины 251 мм. Средняя механическая скорость бурения розового кварцита (твердая порода) составила 0,15 м/ч, а диаметр скважины - 246 мм. При этом наблюдался интенсивный износ калибровочных лап при бурении кварцита. При бурении

мрамора и известняка стальные шары практически не изнашивались, при бурении же кварцита за 3,5 часа вес порции в 63,5 кг уменьшился на 1,13 кг. Износ поверхностей камеры смешения и других деталей аппарата был незначителен.

Таблица 1 – Условия проведения промышленных испытаний шарикового бура

Параметр	$D_{сн}$ , мм	$M_{кр}$ , кгс·м	$G_{ос}$ , кгс	$V_{вр}$ , об/мин	$d_c$ , мм	$d_{кс}$ , мм	$k_э$	$P_{ст}$ , МПа	$\Delta p_c$ , МПа	$Q$ , л/мин	$d_{ш}$ , мм	$M_{ш}$ , кг	$V_{ж}$ , м/с	$V_{вп}^1$ , м/с	$V_{вп}^2$ , м/с	$V_{вп}^3$ , м/с	$Q_{ш}$ , шт/с	$V_{ш}$ , м/с
Значение	228,6	46,4	736	20	22,1	89	3,6	5,05–5,33	3,9–4,18	1970	31,8	63,4–86,2	24,1	5,5	1,13	0,95	140	22,8
Примечание																		
$D_{сн}$ – диаметр снаряда, $M_{кр}$ – крутящий момент, $G_{ос}$ – осевая нагрузка, $V_{вр}$ – скорость вращения, $d_c$ – диаметр сопла, $d_{кс}$ – диаметр камеры смешения, $k_э$ – коэффициент эжекции, $P_{ст}$ – давление на стояке, $\Delta p_c$ – перепад давления в сопле, $Q$ – расход воды, $d_{ш}$ – диаметр шаров, $M_{ш}$ – масса шаров, $V_{ж}$ – скорость жидкости на выходе из камеры смешения, $V_{вп}^1$ , $V_{вп}^2$ , $V_{вп}^3$ – скорости восходящей жидкости соответственно в зазоре между аппаратом и скважиной, возле сопла и возле буровых труб, $Q_{ш}$ – расход шаров в камере смешения, $V_{ш}$ – скорость вылета шаров из камеры смешения																		

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ было сделано заключение о возможности «производить разрушение горных пород с заметной скоростью, что показывает реальность принципов бурения ударами шаров. Дальнейшие работы могут быть сделаны для полного определения их перспективности в условиях производства» [1].

Однако уже в 1961 г. один из участников группы Л. У. Леджервуд отмечал: «Импульсное шариковое бурение не имеет практического применения. На достигнутом уровне с его помощью можно разрушать породы, но с экономической точки зрения этот процесс значительно менее выгоден, чем обычное вращательное бурение» [1]. Данные выводы обусловлены методической ошибкой: при проведении экспериментов американские ученые, делая акцент на определение физической сущности работы шароструйных аппаратов, бурили различные по крепости горные породы при одинаковой скорости вылета шаров из аппарата, равной 22,8 м/с. Кроме того, буровой снаряд, который ученые называли «гравитационно -инжекторным», имел ряд недостатков. Специальные лапы 7 (рис. 1), контактирующие с забоем скважины для поддержания оптимального расстояния между долотом и забоем, перекрывали часть забоя, создавая необходимость во вращении

снаряда, и относительно быстро изнашивались. Также приходилось поддерживать оптимальный расход жидкости, т.к. при его уменьшении «облако резервных шаров» располагалось ниже сопла, а при увеличении - выше, что приводило к снижению расхода шаров в камере смешения и, как следствие, к падению эффективности бурения.

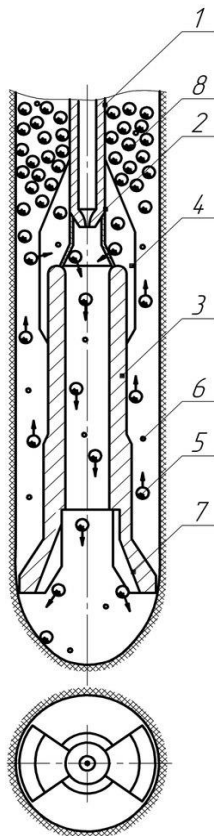


Рисунок 1. «Гравитационно-инжекционный» буровой снаряд [4]:  
1 – колонна бурильных труб; 2 – сопло; 3 – камера смешения; 4 – ребра;  
5 – породоразрушающие шары; 6 – шлам выбуренной породы; 7 – лапы; 8 – «облако резервных шаров»

Вопреки отрицательным выводам первооткрывателей шароструйного бурения, данный способ продолжал вызывать интерес у некоторых исследователей.

Несмотря на приведенные заключения, с 1963 г. в Южно-Казахстанском геологическом управлении начались дальнейшие исследования данного способа бурения, называемого шароструйным (при этом породоразрушающий инструмент (ПРИ) назывался «шароструйным аппаратом»). Причем в силу того, что для эффективной работы шароструйного аппарата нет необходимости в его вращении, его применяли для искусственного искривления геологоразведочных скважин. Ими

использовалась конструкция бурового снаряда с механическим вооружением лопастного типа [5]. В отличие от американского варианта, контакт снаряда с забоем скважины осуществлялся за счет опорного башмака 2, однако, при этом сохранялась необходимость во вращении и осевой нагрузке на долото (рис. 2).

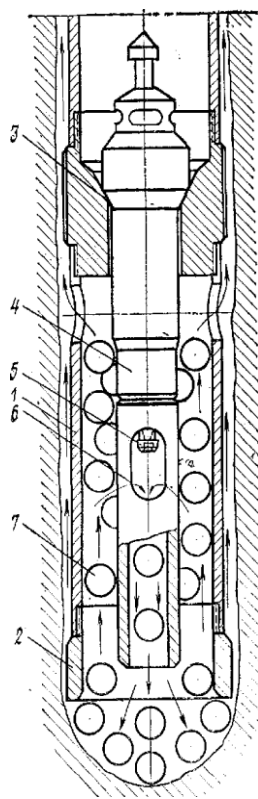


Рисунок 2. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с механическим вооружением лопастного типа:

1 – корпус; 2 – породоразрушающий опорный башмак; 3 – гнездо; 4 – струйный аппарат; 5 – сопло; 6 – камера смешения с окнами; 7 – шары

Анализируя результаты американских ученых, руководитель исследований А.Б. Уваков указывал на их не совсем объективные выводы [6]. Американцы при проведении экспериментов делали акцент на определение физической сущности работы шароструйных аппаратов, в тоже время вопросам разрушения горных пород уделялось неоправданно мало внимания. В результате они совершили явную ошибку, пытаясь бурить различные по крепости горные породы при одинаковой скорости вылета шаров из аппарата, равной 22,8 м/с.

В результате проведенных исследований, подробно описанных в работах [6, 7], были выявлены основные аналитические зависимости, характеризующие процесс разрушения горных пород ударами шаров, разработана методика расчета процессов шароструйного бурения, проведены

лабораторные и полевые испытания, рассчитана экономическая эффективность данного способа. Экспериментально установлено, что в оптимальном режиме работы шароструйных аппаратов механическая скорость бурения возрастает с увеличением крепости горных пород и может быть равной 20 м/ч в крепких и очень крепких породах. Причем большой износ снаряда можно исключить за счет создания оптимальной скорости вылета шаров, при которой отсутствуют отскоки шаров от забоя. Указываются следующие преимущества шароструйного бурения: простота устройства шароструйного аппарата, возможность упрощения и облегчения бурового станка вследствие отсутствия необходимости создания больших осевых нагрузок и вращающих моментов, экологическая безопасность. Также авторы указывают на следующие недостатки шароструйного бурения: необходимость установки мощного насоса и невозможность отбора керна. В дальнейшем разработанный Уваковым А.Б. шароструйный снаряд подвергался неоднократным усовершенствованиям.

В диссертации казахского ученого Заурбекова С.А. 1995 г. [8] были определены рациональные параметры процессов разрушения при шароструйном бурении, на основании чего разработана новая конструкция шароструйного снаряда ШСМ-216 с соплом и камерой смешения кольцевой формы (рис. 3). Периферийная часть забоя разрушалась шароструйным способом, центральная - вращательным при помощи опоры с твердосплавными зубьями. Такая конструкция обеспечивала поддержание оптимального расстояния между долотом и забоем в процессе бурения, позволяла снять ограничения на максимальный расход промывочной жидкости, а также направлять шары во впускные окна. К недостаткам можно было отнести необходимость во вращении снаряда и осевой нагрузке, быстрый износ опоры, сложность управления процессом бурения при комбинированном разрушении забоя.

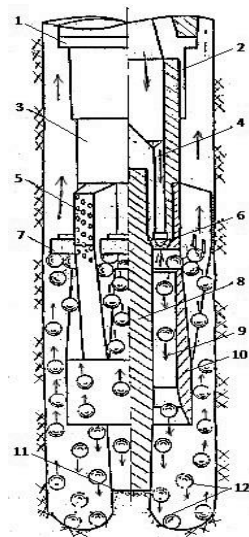


Рисунок 3. Шароструйно-эжекторный буровой снаряд с соплом и камерой смешения кольцевой формы (по Заурбекову С.А.):

1 – калибратор; 2 – переводник; 3 – присоединительная головка; 4 – подводящие жидкость каналы; 5 – калибрующе-центрирующие ребра; 6 – кольцевое сопло; 7 – задерживающее устройство; 8 – опора снаряда; 9 – кольцевая камера смешения; 10 – корпус снаряда; 11 – твердосплавные зубья; 12 – шары

Промышленные испытания показали превышение механической скорости на 20% и проходки на долото на 43% по сравнению с серийными долотами. [8]. Причем бурение осуществлялось роторным способом в интервале 500-1100 м, представленном породами средней крепости, при следующих параметрах режима бурения: расход жидкости - 30 л/с, осевая нагрузка - 10 кН, частота вращения - 90 об/мин, плотность бурового раствора - 1060 кг/м<sup>3</sup>.

Полученные результаты вызвали активный интерес исследователей и производителей. Разработанный Уваковым А.Б. и Штрассером В.В. шароструйный снаряд для бурения скважин [9] подвергался дальнейшему совершенствованию. Дербенев Л.С. и др. разработали снаряд для эрозионного бурения [10], снабженное средством для определения расстояния от его среза до забоя скважины, связанное с механизмом подачи насадки. А.В. Дугарцыреновым и др. заявлена конструкция шароструйного снаряда [11], в котором сопловая насадка и разгонная камера соединены шарнирно-поворотной, что обеспечивает требуемый диаметр скважины по всей глубине. Зубкова Т.Н. разработала две конструкции шароструйного снаряда [12, 13]. В



первом нижняя внутренняя часть снаряда снабжена магнитами для улучшения циркуляции породоразрушающих шаров, а на разгонной камере находится бункер для точного направления шаров в ее окна. Особенностью второго снаряда является то, что струйный аппарат расположен эксцентрично в кожухе и жестко прикреплен под углом  $20-70^\circ$  к заглушке, связанной с колонной бурильных труб с возможностью кругового перемещения относительно вертикальной оси устройства, что обеспечивает равномерное разрушение забоя.

Кроме того, известны конструкции шароструйной буровой головки [14], гидромониторно-эжекторных насадок на шарошечные долота и долота истирающего типа [15, 16], гидромониторного бура для бурения рыхлых горных пород при гидродобыче [17], шароструйного снаряда с нагревателем для бурения в мерзлых горных породах [18].

В XXI веке интерес специалистов к шароструйному бурению заметно снизился. В публикуемых работах чаще рассматриваются проблемы конструирования при исследовании комбинированных способов разрушения горных пород. Так шароструйное бурение заинтересовало украинских исследователей [19-21], которые разработали гидродинамический снаряд, в основе которого лежит комбинация шароструйного и дробового бурения. Однако информации о проведении дальнейших исследований в работах не было представлено.

Анализ и обобщение результатов работ, посвященных исследованию шароструйного бурения, позволяет прийти к выводу, что оно является довольно перспективным, однако требует проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, а также конструкторских проработок, что может позволить выйти на применение в практике буровых работ.

С 2012 г. исследования данного способа проводятся на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета. В ходе них было доказано, что оптимальной является конструкция ШЭБС с соплом, камерой смешения цилиндрической формы и коническим диффузором с их

последовательным осевым расположением (рис. 4). Принцип действия снаряда следующий: рабочая жидкость, подводимая к аппарату, ускоряется в сопле 1 и на выходе из него истекает с большой скоростью в камеру смешения 2. При этом в пространстве, окружающем выход сопла 1 с внешней стороны, образуется зона разрежения. В корпусе снаряда выполнены технологические окна 3, через которые благодаря разрежению происходит всасывание рабочей жидкости со взвешенными шарами 5 и частицами шлама 6 из затрубного пространства. Далее двухфазная смесь проходит через камеру смешения 2, поступает в диффузор 4 и ударяется о породу 7, осуществляя разрушение. Далее шары 5 поднимаются в затрубном пространстве, отражаются от задерживающего устройства 8 и через технологические окна 3 направляются в камеру смешения 2. Затем цикл повторяется.

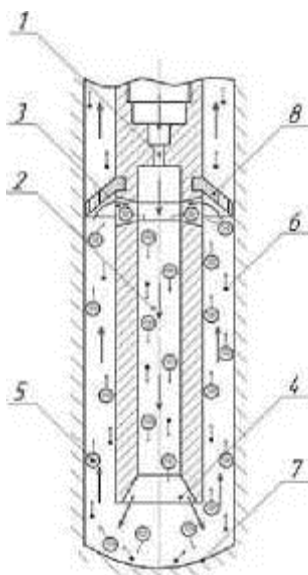


Рисунок 4. Шароструйноэжекторный буровой снаряд и принцип его работы:  
1 - сопло; 2 - камера смешения; 3 - технологические окна; 4 - диффузор; 5 - шары; 6 - частицы шлама; 7 - разрушаемая порода; 8 - задерживающее устройство.

На основе теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

- выявлены зависимости влияния технологических параметров режима и геометрических параметров бурового снаряда на эффективность шароструйного бурения;

- впервые выполнена высокоскоростная (3600 кадров в секунду) съемка для исследования быстропротекающих процессов шароструйного бурения, позволившая разработать физическую модель;
- разработана методика расчета технологических процессов шароструйного бурения в различных геологотехнических условиях.

В целях дальнейшего повышения эффективности шароструйного бурения и внедрения его в практику буровых работ необходимо продолжить исследовательские и опытно-конструкторские работы в следующих направлениях [22]:

- детальное изучение энергетического вопроса с целью установления КПД шароструйного бурения;
- исследование влияния различных типов промывочных жидкостей на эффективность бурения;
- разработка математической модели процессов шароструйного бурения скважин, позволяющую рассчитывать ожидаемую механическую скорость бурения в различных геолого-технических условиях;
- разработка мероприятия по повышению износостойкости снаряда;
- разработка и испытание способов контроля процессов шароструйного бурения скважин;
- разработка конструкции улавливающе-подпитывающего устройства, позволяющего заменять изношенные шары новыми, доставлять шары на забой и поднимать их из скважины вместе с буровым снарядом, для снижения затрат времени на спуско-подъемные операции;
- выполнение исследований и опытно-конструкторских работ по решению проблемы наклоннонаправленного бурения скважин с помощью шароструйно-эжекторного бурового снаряда.

## **1.2 Имеющийся задел по разработке улавливающе-подпитывающего устройства**

В настоящее время на кафедре бурения скважин Томского политехнического университета проводятся теоретические и

экспериментальные исследования шароструйного способа бурения, который может дать значительный прирост скорости бурения в твердых и крепких горных породах, увеличить проходку на долото. Кроме того, шароструйный способ бурения легко вписывается в существующую технологию бурения механическими способами с промывкой и не потребует значительного переоборудования буровой установки.

Шароструйный способ бурения основан на разрушении горных пород посредством воздействия металлических шаров, обладающих большой кинетической энергией непосредственно перед контактом с породой и многократно циркулирующих в призабойной зоне скважины за счет струйного аппарата, положенного в основу конструкции шароструйно-эжекторного долота.

Группой ученых из Томского политехнического университета было доказано [1], что наиболее эффективной для разрушения твердых и крепких горных пород является конструкция шароструйно-эжекторного бурового снаряда с соплом и камерой смешения цилиндрической формы с их последовательным осевым расположением. При этом камера смешения должна заканчиваться диффузором, а для направления шаров из затрубного пространства непосредственно в камеру смешения в конструкцию снаряда должно включаться задерживающее устройство.

#### 1.2.1. Разработка улавливающе-подпитывающего устройства

В процессе шароструйного бурения неизбежен износ шаров. Результаты американских исследователей свидетельствуют о том, что при бурении кварцита за 3,5 часа вес порции в 63,5 кг уменьшился на 1,13 кг [2]. По результатам промышленных испытаний Увакова А.Б. [3] в среднем за 100 ч бурения шары изнашиваются по диаметру на 4–5 мм.

Процесс бурения шароструйным способом складывается из определенных последовательных этапов: 1) спуск шаров на забой скважины; 2) спуск шароструйно-эжекторного бурового снаряда; 3) процесс бурения;

4) подъем снаряда из скважины; 5) улавливание шаров с забоя скважины.

По методикам расчета шароструйных снарядов различных авторов [2–5] диаметр используемых шаров больше диаметра первичного сопла, т.е. исключается возможность спуска шаров через колонну бурильных труб. Спуск шаров через зазор между бурильными трубами и стенками скважины является нерациональным вследствие высокой вероятности заклинивания шаров и их недоспуска до забоя скважины. В ходе производственных испытаний способа было опробовано два способа доставки шаров на забой. Первый способ заключался в доставке шаров в бумажных пакетах, сбрасываемых в скважину, которые после начала циркуляции бурового раствора размягчались и выносились на устье. Второй вариант доставки – с помощью контейнера, представляющего из себя колонковую трубу, суженную в нижней части и забитую глиной. Контейнер спускали на бурильных трубах, включением насоса под давлением промывочной жидкости шары выдавливались из контейнера, после чего он поднимался.

Для извлечения шаров с забоя скважины использовали шароуловители различных конструкций, спускаемые на забой скважины после подъема долота из скважины.

Высокая трудоемкость, низкая надежность и значительные потери времени на спуско-подъемные операции при выполнении операций по замене изношенных шаров новыми требуют разработки технических средств, обеспечивающих повышение рейсовой скорости бурения. Так, представляется возможной разработка устройства, способного наряду с заменой изношенных шаров новыми спускать шары на забой и поднимать их с забоя скважины вместе с буровым снарядом. Исходя из целевого назначения предлагаемого устройства, назовем его улавливающе-подпитывающим.

Разработанная схема компоновки низа бурильной колонны с улавливающе-подпитывающим устройством (УПУ) представлена на рисунке 1. При этом УПУ состоит из складывающегося задерживающего устройства 2 лепесткового типа, забойных шаропитателя 3 и шароуловителя 4.

Принцип работы УПУ заключается в выполнении следующей последовательности технологических операций:

1. спуск представленной компоновки низа бурильной колонны до забоя скважины (при этом задерживающее устройство находится в транспортном положении);
2. воздействие на забойный шаропитатель с целью подачи на забой первой порции шаров;
3. воздействие на задерживающее устройство (ЗУ), перевод его в рабочее положение;
4. процесс бурения до появления признаков чрезмерного износа шаров;
5. воздействие на ЗУ, перевод его в транспортное положение (при этом лепестки ЗУ перекрывают технологические окна бурового снаряда);
6. включение бурового насоса, подъем шаров до забойного шароуловителя, их улавливание;
7. воздействие на забойный шаропитатель, приводящее к высыпанию второй порции шаров на забой;
8. воздействие на ЗУ, перевод его в рабочее положение;
9. включение насоса, возобновление процесса бурения.

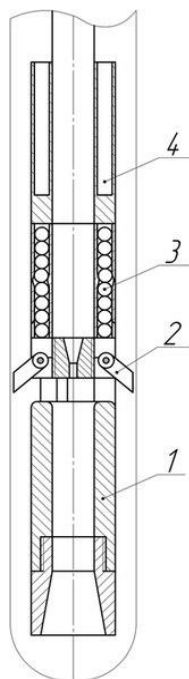


Рисунок 5. Схема компоновки низа бурильной колонны с улавливающе-подпитывающим устройством:

- 1 – буровой снаряд; 2 – задерживающее устройство; 3 – забойный шаропитатель;  
4 – забойный шароуловитель

### 1.2.2. Разработка забойного шаропитателя

На первом этапе конструкторских работ нами разработан забойный шаропитатель [6], представленный на рисунке 2.

Забойный шаропитатель состоит из корпуса 1, соединенного в верхней части с колонной бурильных труб 2 и в нижней части с шароструйным аппаратом 3, и подвижного элемента 4, имеющего седло 5 для герметизированной посадки запорного клапана 6. В корпусе 1 имеется центральный 7 и перепускной канал 8. Между корпусом 1 и подвижным элементом 4 располагается пружина 9 и отсек для размещения шаров 10.

Принцип работы шаропитателя заключается в следующем. Перед спуском шаропитателя в скважину в отсек для размещения шаров 12 засыпаются шары. В процессе бурения через центральный канал 7 корпуса прокачивают буровой раствор. Подвижный элемент 4 удерживается в крайнем верхнем положении пружиной 9. Для осуществления подпитки шаров без остановки циркуляции бурового раствора с устья скважины в колонну бурильных труб 2 сбрасывают запорный клапан 6, который садится в седло 5 и перекрывает центральный канал 7. За счет роста давления бурового раствора на седло 5 пружина 9 будет сжиматься и подвижный элемент 4 переместится в крайнее нижнее положение, открыв перепускной канал 8. Благодаря воздействию сил гравитации и давления бурового раствора, подводимого через перепускной канал 8, шары высыплются из отсека для их размещения 10 в затрубное пространство. После высыпания шаров останавливается циркуляция бурового раствора, при этом подвижный элемент 4 возвращается в исходное положение. Запорный клапан 6 извлекается из колонны бурильных труб 2 при помощи овершота, спускаемого на талевом канате. Далее включается буровой насос, процесс бурения возобновляется.

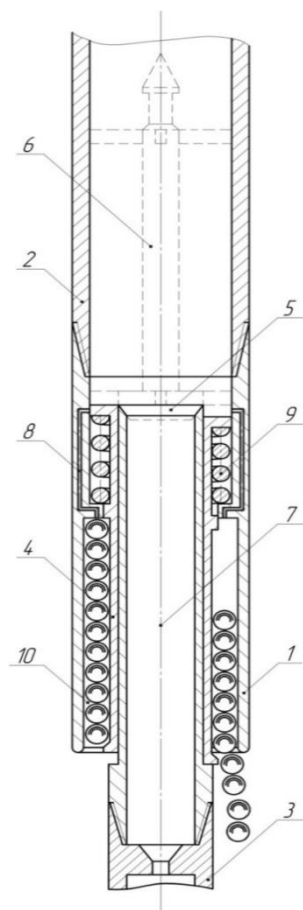


Рисунок 6. Забойный шаропитатель:

1 – корпус; 2 – колонна буровых труб; 3 – ШЭБС; 4 – подвижный элемент; 5 – седло; 6 – запорный клапан; 7 – центральный канал; 8 – перепускной канал; 9 – пружина; 10 – отсек для размещения шаров

Это существующие разработки принципиальной схемы улавливающего подпитывающего устройства, способного осуществлять наряду с заменой изношенных шаров новыми спуск шаров на забой и их подъем с забоя скважины вместе с буровым снарядом. Также предложена конструкция забойного шаропитателя, позволяющего высыпать одну порцию шаров на забой скважины.

К числу дальнейших конструкторских работ следует отнести:

- разработка устройства и способа приведения задерживающего устройства в рабочее и транспортное положение;
- разработка конструкций забойных шаропитателей, обеспечивающих порционную подачу шаров на забой скважины;
- создание эффективных конструкций забойных шароуловителей;
- поиск альтернативных способов воздействия на элементы УПУ



### **1.3 Анализ способов управления элементами забойного оборудования.**

В основу рассмотрения и последующей классификации было взято следующее оборудование : скважинные расширители, пакеры , якоря ,подвески хвостовиков.

#### **1.3.1 Скважинные расширители**

Раздвижные расширители делятся по характеру приведения из транспортного в рабочее положение на механические, гидравлические и инерционные.

При помощи давления, которое развивается в нагнетательной магистрали насоса и корпусе инструмента при промывке , приводятся в рабочее положение гидравлические раздвижные расширители.

После промывки посредством возвратного усилия пружин закрываются породоразрушающие органы.

За счет центробежных сил, которые действуют на породоразрушающие органы при вращении инструмента, инерционные раздвижные расширители приводятся в рабочее положение. Под давлением собственного веса закрываются лопасти.

Нераздвижные расширители подразделяются на эксцентриковые, гидромониторные и комбинированные по характеру приведения в рабочее положение и воздействия на разрушаемый забой.

Эксцентриковые расширители имеют эксцентричную массу,которая смещена относительно оси скважины. Колонна труб с расширителем за счет действия центробежных сил описывает прецессионное движение в стволе. После чего закрепленный на корпусе породоразрушающий орган увеличивает диаметр скважины за счет разрушения ее боковой поверхности.

Основой гидромониторных расширителей является воздействие струи, истекающей из насадок, на породу , залегающую в интервале продуктивного пласта. После спуска в заданный интервал и создания расчетного перепада

давления на насадках гидромониторные расширители приводятся в рабочее состояние.

Нераздвижные расширители комбинированного действия сочетают и механическое с гидродинамическим воздействием разрушением забоя. Для приведения необходимо обеспечить циркуляция промывочной жидкости в скважине и вращение колонны бурильных труб приводят комбинированный расширитель в рабочее положение.

Скважинные расширители могут, как иметь выдвижные породоразрушающие органы, так и не иметь для создания каверн в интервале продуктивного пласта. Размер раздвижных расширителей различается в зависимости от положения (транспортный или рабочий). Беспрепятственный спуск инструмента в заданный интервал скважины обеспечивает размер корпуса, находящийся в транспортном положении с учетом диаметров обсадных труб и бурения пилотствала. После спуска, достигнув заданного интервала, породоразрушающие органы выдвигаются из корпуса, закончив расширение, убираются обратно [14].

Раздвижные расширители различают по характеру приведения из транспортного в рабочее положение на механические, гидравлические и инерционные.

Принцип действия гидравлических и механических расширителей соответствуют условиям модернизации ЗУ, поэтому они были взяты на рассмотрение. Инерционные расширители не рассматривались, потому что они действуют на породоразрушающие органы за счет вращения инструмента, которое противоречит исходной концепции шароструйного бурения.

Скважинный расширитель со складывающимися лепестками послужил прототипом ЗУ [15]. Принцип расширителя заключается в воздействии поступательно движущегося толкателя на шарнирные породоразрушающие органы. Толкатель при этом является продолжением подпружиненного поршня со штоком, который приводится в движение промывочной жидкостью.

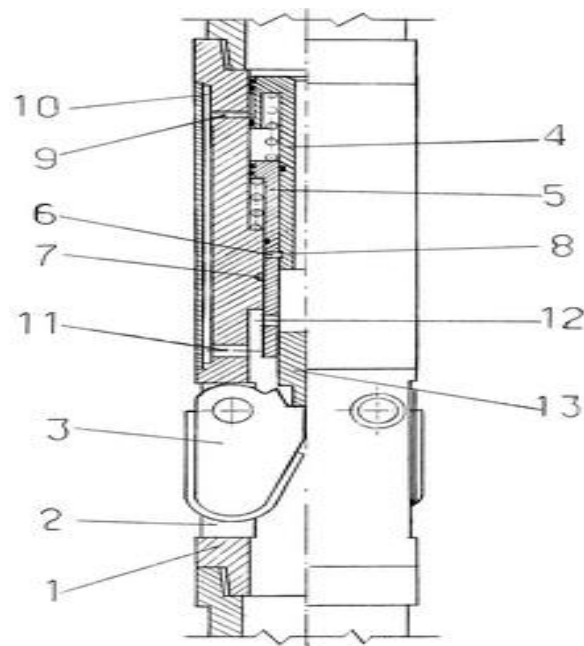


Рисунок 7 – Раздвижной скважинный расширитель:  
 1 – корпус, 2 – пазы, 3 – породоразрушающие органы, 4 – шток, 5 – поршень,  
 6 – фиксирующие средства, 7, 8 – упорная канавка,  
 9, 11, 12 – промывочные каналы, 10 – перепускная камера, 13 – толкатель

### 1.3.2 Пакеры и якоря

Различают пакеры следующих типов:

ПВ — пакер, воспринимающий усилия от перепада давления, направленного вверх; ПН — направленного вниз; ПД — направленного как вниз, так и вверх.

Для восприятия усилия от перепада давления, действующего на пакер в одном или двух направлениях, пакер должен иметь соответствующее закоривающее устройство (якорь), наличие которого в шифре пакера обозначается буквой «Я». Якоря в основном применяют с пакерами типов ПВ и ПН.

По способу посадки пакеры подразделяют на гидравлические Г, механические М и гидромеханические ГМ

**Якорь гидравлический типа ЯГ и 2ЯГ** .Якорь спускается в скважину на колонне насосно-компрессорных труб вместе с пакером, закоривается в эксплуатационной колонне при подаче в трубы жидкости под давлением.

Через отверстие а жидкость воздействует на поршень и после срезания винтов перемещает плашки с плашкодержателем вверх. Плашки, перемещаясь по корпусу, раздвигаются радиально и заякориваются за стенки обсадной колонны. Якорь освобождается при подъеме колонны насосно-компрессорных труб.

**Якорь гидромеханический типа ЯГМ** . В скважину якорь спускают с пакером на колонне труб, при этом конус удерживается в верхнем положении пружинным кольцом. При посадке пакера вращательное движение и осевая нагрузка от труб к пакеру передаются через головку, шток и переводник якоря. После посадки якоря под давлением нагнетаемой в трубы жидкости конус освобождается от пружинного кольца и перемещается вниз, вклиниваясь под шлипсы, которые раздвигаются до контакта с обсадной колонной и воспринимают нагрузку пакера. Якорь вместе с пакером снимается с места установки натяжением колонны труб, при этом головка выталкивает конус из-под шлипсов, и якорь приводится в первоначальное положение.

### **1.3.3. Подвески хвостовик**

**Хвостовик** заменяет либо эксплуатационную колонну (самый распространенный случай), либо промежуточную (используется реже).

Различают хвостовики следующих типов:

**Механическая клиновая подвеска** - после спуска хвостовика на заданную глубину колонну труб приподнимают на необходимую высоту и поворачивают влево. при этом штифт, повернутый совместно с корпусом, выходит из зацепления с крючком, который остается неподвижным относительно корпуса подвески вследствие действия сил трения при взаимодействии распертого центратора со стенками обсадной колонны. Далее колонну плавно подают вниз, конусообразная муфта начинает входить в клиновидные плашки, раздвигая их до полного расклинивания в кольцевом межколонном зазоре. хвостовик остается подвешенным на клиновидных плашках, упирающихся в стенки обсадной трубы предыдущей колонны.

**Клиновая подвеска гидравлического действия** - При повышении давления внутри корпуса на гильзу 6 действуют силы, направленные в сторону наконечника. В расчетный момент силы, достаточного для среза срезного элемента, элемент срезается, гильза с наконечником, перемещаясь, двигают посредством планок подвижных клиньев подвижные клинья, которые взаимодействуя с неподвижными клиньями отжимаются, увеличивая диаметр конструкции, фиксируя подвеску хвостовика внутри скважины.

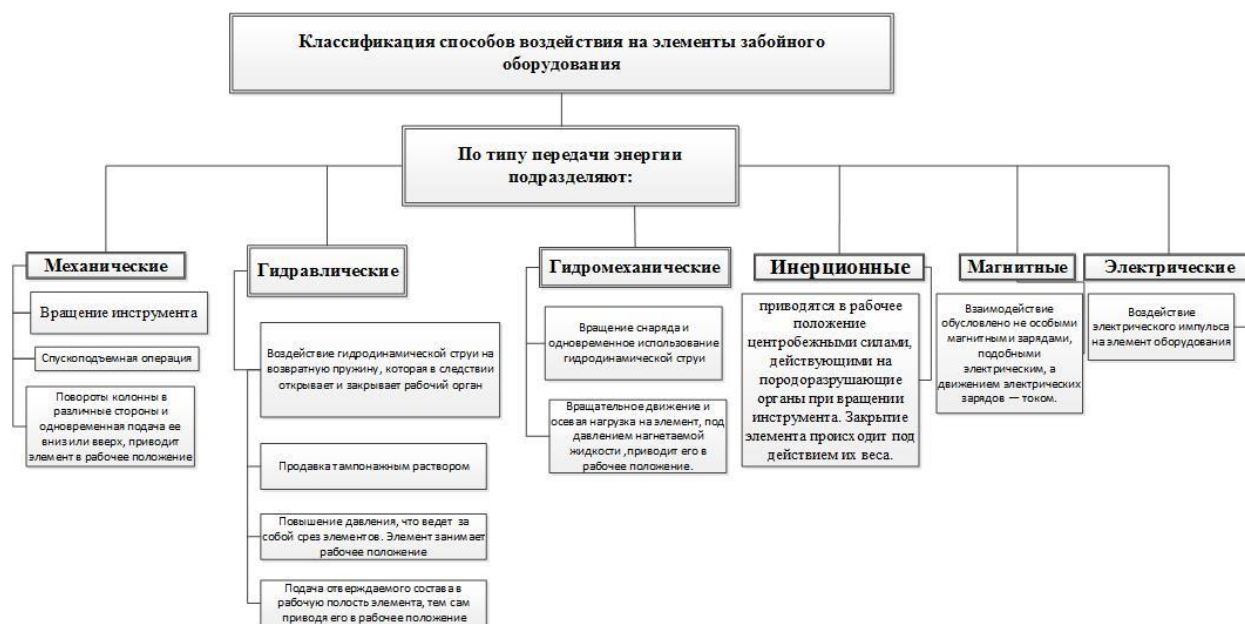


Рисунок 8. Классификация способов воздействия на элементы забойного оборудования

Разделы не подлежащие публикации в связи с разработкой новой технологии, претендующей на патент:

- Разработка схем забойных шароуловителей.
- Разработка схем забойных шаропитателей.
- Синхронизация работы забойных шаропитателей и шароуловителей.

## Приложение (A)

### **Abrasive-Enhanced Water-Jet Drill for Hard Rocks**

## **Water and abrasive jetting, and mechanical techniques expedite hard rock drilling**

The U.S. Bureau of Mines has patented and transferred to industry an abrasive-enhanced water-jet rock drill. This drill incorporates three novel components: a collimator, jet deflectors for cutting clearance, and an unpressurized swivel, which rotates at 1,000 rpm while passing 20 gpm of an abrasive slurry flowing at 1,000 ft/s.

Drilling occurs through the action of a 10,000-psi, 20-gpm water jet into which is entrained 22 lb/min of abrasives. The pumps, hoses, and fittings are those commonly used in the water-jet-cleaning industry. Only inexpensive, common sandblasting abrasives are used.

This drill can cut through hard rocks with moderate-pressure jets; e.g., rocks with a compressive strength of 73,000 psi can be drilled with a 10,000-psi abrasive jet. In addition to drilling holes, the drill can cut deep, narrow kerfs; collar a hole at any angle; drill through rubble; and chamber holes.

The development of the abrasive jet drill is a significant advance in the state of the art of hard-rock drilling. The Government of the United States has licensed the abrasive jet drill patent to Weatherford Water Jetting Systems.

### **Collimator**

A water jet formed by the discharge of a nozzle into a pipe will not dissipate. It will retain its cutting ability significantly beyond the distance at which jets passing through air are effective [5]. The jet is constrained to flow parallel to the pipe axis; i.e., it is collimated. This collimated flow reduces the rate of loss of momentum of the jet as compared with a water jet in air. A water jet in air loses its rock-cutting ability shortly after exiting the nozzle, whereas the collimated abrasive jet has drilled hard rock (a dolomite with a compressive strength of 20,000 psi) 5 ft from the nozzle. Experiments have shown that a collimated abrasive jet retains 75 pet of its energy after passing through a 10-ft length of collimating pipe.



In the abrasive jet drill, water from a 10,000-psi, 20-gpm pump is accelerated to 1,250 ft/s through a 0.080-inch diameter nozzle. The water then entrains sand and air, and the resultant slurry enters an ANSI schedule 160 steel pipe (the collimator). Lengths of pipe from 2 to 10 ft have been used as collimators. Abrasive particles are accelerated by the jet and retain most of their kinetic energy as they pass through the collimator. Sand particle velocities as high as 1,000 ft/s have been measured at the outlet of the collimating pipe by double-exposure, highspeed photography.

Since a collimating pipe situated downstream of a high-pressure nozzle permits a high-velocity jet to retain its cutting ability for several feet, the collimating pipe can serve as a drill rod. In the Bureau's abrasive water-jet rock drill, the nozzle is situated several feet upstream of the end of the drill so that it never enters the drill hole. The drill stem downstream of the nozzle is not pressurized. This is in contrast to conventional water-jet drills, which use a multiple-pass nozzle situated at the bottom of the hole at the end of the string of pressurized pipe.

### **Jet deflectors for cutting clearance**

Drill pipes must be capable of following into a drill hole as the hole deepens. The drill must cut a hole wider than the outside diameter of the drill stem. Conventional water-jet drills accomplish this by using rotating, multiple-orifice nozzles at the downstream end of the drill string.

This arrangement has not proven practical for an abrasive jet drill because the multiple orifice is quickly destroyed by wear. Instead, with the Bureau's drill, clearance is cut by deflecting the jet with two 1- by 0.25- by 0.125-in carbide plates silver soldered into slots at the end of the collimating pipe. These plates are positioned so that a portion of the jet is deflected and cuts wider than the pipe diameter, while the remainder of the jet passes undeviated between the deflectors and cuts the central portion of the drill hole.

The carbide deflectors are placed at an angle of 15° to the center plane of the collimator. This placement permits the abrasive jet to cut a hole wide enough for the collimating pipe to enter and deep enough to maintain a steady advance into the drill hole.

The deflection angle chosen is a compromise between the competing needs for axial and radial cutting. High angles of incidence of the abrasive onto the carbides engender wide, shallow cuts, while low angles of incidence give narrower and deeper cuts. Of course, the collimating pipe and the deflectors exhibit wear, but both the pipe and the plates are low-cost, expendable items. The wear process is such that both the pipe and the deflector plates are worn out after about 2 h of abrasive jetting at 10,000 psi, 20 gpm[2].

### **Nonpressurized swivel for passing abrasive streams**

Present state of the art requires that the drill string of a water-jet drill be rotated in order to cut clearance. Rotation of a conventional water-jet drill requires that the pressurized water pass through a swivel. This swivel must contain high pressure (10,000 to 30,000 psi) while rotating at high speeds (500 to 2,000 rpm). Because of these requirements, the high-pressure swivels are apt to be expensive and unreliable.

The Bureau's abrasive jet drill avoids the problem of high-pressure swivels because the fluid in the collimating pipe downstream of the nozzle is not pressurized but exhibits a vacuum. The pipe is rotated inside a sealed ball bearing and a pillow block bearing. The rotary motion is imparted by a hydraulic motor coupled to the pipe by a chain and sprocket. The simple bearing swivel is very inexpensive (\$8 in 1986)[2].

### **Design of the drill**

The drill, as described in the preceding sections, is essentially a rotating collimating pipe terminated by silicon carbide deflectors. The drilling apparatus is composed of these essential parts and has various means of activation and control. Water (20 gpm) is pressurized (10,000 psi) by an Aquadyne model GE150 DT triplex pump and fed through water-blaster hoses to a 0.080-in-diameter 3D Leach and Walker nozzle [6]. This nozzle has a 13° conical taper downstream from the incoming conduit and terminates in a straight section with a length equal to three outlet diameters. The pressure is dropped across this nozzle as the jet discharges into

a mixing chamber. The Venturi effect thus created entrains 22 lb/min of sand and air into the mixing section through hoses connected to a sand lance in a barrel. Sand, air, and water are mixed and flow at 1,000 ft/s through the collimating pipe. The drill is carried on a carriage, upon which are mounted controls for the air and hydraulic systems. The drill is remotely controlled from an operator's station. The collimating pipe is rotated at 250 to 1,000 rpm by a motor coupled to the pipe by a chain and sprocket. The drill rides on two orthogonal screw-driven mounts, permitting the drill to be translated along the surface of the rock as well as to penetrate into the rock. This capability permits the drill to be used to cut kerfs as well as to drill holes.

## Drilling

Test holes were drilled in samples of Sioux Quartzite, St. Cloud Gray Granodiorite, Oneota Dolomite, and Salem Limestone. Test data are given in table 1. These tests were conducted with a 10,000-psi, 20-gpm water jet, a rotational speed of 600 to 700 rpm, and an entrainment rate of 22 lb/min of dry sand. Deflectors were set at 15° to the axis of the pipe.

These test data show that hard rock can be drilled with an abrasive jet drill, but the penetration rate attainable varies with rock hardness. Table 1 gives the maximum penetration rate attained for each rock tested[3].

Table 1. Penetration rate In four rocks

Rock	Compressive strength, psi	Penetration rate, in/min
Sioux Quartzite	73,000	4
St. Cloud Gray Granodiorite	30,000	4
Oneota Dolomite	20,000	6
Salem Limestone	8,000	30

The Bureau's abrasive-enhanced water-jet drill offers the following advantages over other rock drills. This drill—

1. Can operate with a pressure that is far lower than that of conventional water-jet drills. The abrasive water-jet drill can cut hard rock with a compressive strength of 70,000 psi with 10,000-psi water pressure. Other water-jet drills must use a pressure approximately equal to the compressive strength of the rock. The

abrasive-enhanced water-jet drill uses only commercially available hoses and fittings commonly used in the water-jet-cleaning industry.

2. Does not physically contact the rock and, thus, does not have to absorb the force of the rock pushing back on the drill rod. This permits the drill to be built of much lighter materials than conventional drills.

3. Does not require a bit.

4. Can enlarge (chamber) selected parts of the drill hole by slowing the penetration rate. This capability would be helpful to mine operators who must blast tough rock. The chambers can be loaded with extra explosive to put increased rock-breaking power where it is most needed.

5. Can penetrate uncompacted, loose rock . This ability could be used to drill probe holes or blastholes in gob areas of mines.

6. Can drill holes that overlap. Overlapping holes can be strung together to create a kerf.

7. Can make small-diameter (less than 1 in) holes. These small holes are ideal for resin-grouted rock bolts because their smaller size decreases the volume of grout required.

Conventional rotary or percussive rock drills are incapable of performing the functions described under items 5, 6, and 7[4].

### **Abrasives**

The drilling abilities of garnet and silica sand were compared by drilling for 10 s with the abrasive jet drill, measuring the volume of each hole, and comparing the volume data (table 2). Three holes were drilled into blocks of Sioux Quartzite with each abrasive. These samples have an unconfined compressive strength of 73,000 psi. These data indicate that, on a per-pound basis, the New York garnet is 63 pet and the Idaho garnet is 40 pet more effective than silica sand in drilling Sioux Quartzite. However, silica sand is used in most of the routine drilling because it is much less expensive [4].

Table 2.-Drilling ability of garnet and silica sand

		New York garnet	Idaho garnet	Silica sand
Weight used	lb per 10 s	.3.6	4.9	4.9
Volume removed	cm3 per 10 s	6.9	8.1	5.8
Volume per weight	cm3/lb	1.92	1.65	1.18
Normalization of volume per weight		.1.63	1.40	1.00

### **Parametric drilling studies on nickel ore from sudbury, Ontario**

Parametric test drilling was conducted on samples of nickeliferous breccia and gneiss from the nickel district of Sudbury, Ontario, Canada. The objective was to enhance the effectiveness of the abrasive jet drill as a first step in the development of a blasthole drill or roof drill suitable for use in the hard rock in mines in the Sudbury district. The parameters investigated were water pressure, drill fluid chemistry, drill rotation speed, and pipe size [5].

#### **Water Pressure**

An important purpose of the testing was to determine if the drilling rate could be increased by increasing the pressure of the water jet while keeping the total power constant. Table 3 compares the results of drilling at 10,000 and 20,000 psi.

Table 3.Drilling test parameters and results

Rock	Pressure, psi	Flow rate,gpm	Abrasive rate, lb/min	Penetration rate, lb/min
Breccia	10,000	17	24	5
	20,000	12	33	5
Gneiss	10,000	17	24	3
	20,000	12	33	3

Many pumps used in water-jet cutting can be operated over a range of pressures and flow rates. Since the total power delivered by the pump is limited, an increase in the pressure of a jet is normally accompanied by a decrease in flow rate. In order to see if the drilling rate could be increased by an increase in the pressure delivered by the pump, drilling was conducted at 10,000 psi, 17 gpm and compared with drilling at 20,000 psi, 12 gpm. The results of this test are given in table 3, along

with the drilling parameters. Three repetitions were performed at each pressure and flow rate. The rate of advance of the drill into the hole was preset. If the hole deepened at a rate equal to the drill advance rate, a hole was drilled through the rock and the trial was deemed successful. If the hole deepened at a rate slower than the drill advanced, the drill rod would stick in the hole and the trial was deemed a failure.

These test data show that there is little advantage in operating the drill at 20,000 psi. A 10,000-psi jet appears to be as effective as a 20,000-psi jet of comparable horsepower. This is not surprising because the cutting ability of a water jet is determined primarily by the energy in the jet. Lower pressure operation is desirable because the equipment experiences much more wear when the drill is operated at 20,000 psi [5].

### **Drill fluid chemistry**

A series of drilling tests were performed in breccia, using various levels of a commercially available polyacrylamide additive, to determine the effect of additive concentration on penetration rate. The long-chain polymer additive has been used for 15 years as a collimating agent by the water-jet-cleaning industry [7]. The following four additive concentration levels were tested; 0.3, 0.15, 0.075, and 0.0375 vol pet. Penetration did not increase at the first three levels and the drill stuck. The 0.0375-pct addition increased the drilling rate about 1 in/min. These results are at variance with the practice of the water-jet-cleaning industry, which claims that a concentration of 0.3 vol pet is optimum for maintaining collimation of water jets.

### **Drill Rotation Speed**

Tests were conducted to determine the effect of rotation speed on the penetration rate in breccia. Tests were conducted at 250, 500, 750, 800, and 1,000 rpm, with constant conditions of 20,000-psi, 12-gpm, red flint abrasive. A penetration rate of 6 in/min was achieved, but the rotation speed was shown to have

only a small effect on penetration rate. The optimum penetration rate was found to occur between 600 and 1,000 rpm.

### **Pipe Size**

It was suggested that drilling rates might be enhanced if the velocity in the collimating pipe was increased by forcing the discharge from the pump to flow into a smaller collimating pipe. It is not possible to drill with pipes smaller than 0.5 in because no method exists for attaching deflector plates onto smaller pipe. Accordingly, static cutting tests were performed to determine if the pipe size affected penetration rate.

In these tests, the collimating pipe was placed at a standoff distance of 1 in from the rock, and a jet from each pipe impacted the rock for 10 s. The volume cut was measured. Table 4 contains the data. These data indicate that the cutting ability decreases with decreasing pipe diameter.

Table 4. Volume cut by 10-s static

Nominal pipe size,in	Inside diameter,in	Volume cut, cm <sup>3</sup>
1/2	0.546	4.7
3/8	423	3.8
1/4	302	1.0

### **Polyethylene oxide additive**

An experiment was performed to determine the effectiveness of the zeta-potential drilling fluid polyethylene oxide in the abrasive jet cutting of Sioux Quartzite. The Bureau's abrasive jet drill operating at 10,000 psi, 17 gpm was traversed across a block of quartzite at 5 in/min using the following different types of jets: water only, water and abrasive, water with 50 ppm polymer, water, abrasive, and 15 ppm polymer, and water, abrasive, and 50 ppm polymer. The results of the tests were compared. The volume of rock cut in each test was measured, and these measurements were compared. This trial showed that 15 ppm of polymer enhanced cutting 5.5 pet, while 50 ppm of polymer enhanced cutting 3.9 pet as compared with abrasive jets without polymer. This level of rock cutting enhancement can be explained in terms of reduction of friction in the flow of fluid through the pump and drill [6].

## **Kerfing**

Long, narrow kerfs can be cut if the collimating pipe is rotated and translated simultaneously. If the pipe is fed into the kerf as cutting proceeds, the kerf can be cut deep. Kerfs have been cut 34 in into Salem Limestone and 19 in into Oneota Dolomite.

A narrow (1-in) kerf was cut through a block of nickeliferous breccia from the Sudbury region of Ontario, Canada. This kerf was cut by repetitively translating a rotating drill across the rock at the rate of 5 s/in, using a 10,000-psi, 17-gpm abrasive jet. The drill was rotating at 600 rpm. Red flint abrasive was fed into the jet at the rate of 24 lb/min. The kerf measures 6.5 by 1.25 by 16.5 in and took 26 min to cut.

The relatively long time taken to cut a kerf is a reflection of the fact that kerf cutting is less efficient than drilling. This inefficiency results from nonuniform cutting caused by inhomogeneities in the rock. Harder material is cut more slowly than the adjacent softer material, creating high spots in the kerf. The collimating pipe cannot penetrate deeper than the depth of these high areas. This causes a longer than optimum standoff distance because the collimating pipe is not able to penetrate to within an inch of the bottom of the cut in the softer areas. Another problem arises when surfaces are created in the walls of the kerf, which require the incident jet to impinge upon the walls at a grazing angle. Grazing angles of incidence are inefficient for cutting because the jet's energy is deflected rather than absorbed by the rock. Surfaces, which present a grazing angle of incidence to the jet, are created when the depth cutting by the undeviated jet outruns the width cutting by the deviated portion of the abrasive jet. In this instance, most of the kinetic energy of the deviated jet is wasted and the cuts are too narrow for the collimator to advance to within an inch of the bottom of the kerf. The standoff distance is then longer than optimum, resulting in drastically reduced cutting rates and consequent lengthening of the time needed to cut the kerf.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной магистерской диссертации изложены результаты теоретических и аналитических исследований технологических процессов шароструйного бурения с использованием современных методических средств и программного компьютерного обеспечения. Анализ результатов исследований показал, что шароструйное бурение обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными:

- цена;
- удобство и простота эксплуатации;
- увеличение производительности.

Внедрение данной разработки позволит сэкономить бюджет 2,1 раза, что доказывает эффективность ШЭБС.

Результаты работы заключаются в следующем:

- более перспективным при бурении скважин в твердых и крепких горных является гидромеханический способ воздействия на элементы оборудования, реализуемый с помощью вращательного движения и осевой нагрузки на элемент под давлением нагнетаемой жидкости.

- разработана конструкция шароуловителя, позволяющая повысить рейсовую скорость бурения.

- доказана экономическая эффективность при внедрении концепта шароуловителя.

В целях дальнейшего внедрения шароструйного бурения и повышения его эффективности необходимо продолжить исследовательские и опытно-конструкторские работы в следующих направлениях:

- 1) разработать и конструкцию подпитывающего устройства для снижения затрат времени на спускоподъемные операции по замене изношенных шаров;

- 2) разработать и испытать способы контроля над процессами шароструйного бурения скважин (в частности, счетчика расхода шаров).